Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No 2, 89-96
ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica

DOI: 10.31548/machenergy.2019.02.089-096

УДК 631.3:62-192

ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІЇ ГОТОВНОСТІ СИСТЕМ «ЛЮДИНА – МАШИНА» ПРИ ЗРОСТАННІ ІНТЕНСИВНОСТЕЙ ВІДМОВ

А. В. Новицький, **З. В. Ружило**

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Кореспонденція авторів: Novytskyy@nubip.edu.ua.

Історія статті: отримано – квітень 2019, акцептовано – червень 2019.
Бібл. 33, рис. 1, табл. 0.

Анотація. В статті приведені дослідження зі встановлення функції готовності ергатичних систем «людина-машина» в перехідний період зниження їх безвідмовності. Встановлення виду функції готовності вирішено аналітичним методом із застосуванням прямих і зворотних перетворень Лапласа-Карсона. В граничних умовах на початку експлуатації і в умовах усталеного псевдо-стаціонарного режиму при тривалій експлуатації систем, отримана функція готовності, яка відповідає фізичній сутності працездатного стану систем. В усталеному режимі функція готовності набуває значень загальноприйнятого коефіцієнта готовності.

Експлуатаційна готовність складної ергатичної системи «людина-машина» в перехідний період зниження ефективності її роботи описується функцією готовності, що включає в себе чотири складових, три з яких представляють суму експонент. Зі зростанням часу експлуатації системи «людина-машина» готовність її до роботи в умовах «старіння» техніки і наростання втоми операторів знижується асимптотично наближаючись до свого фінішного значення. Фінішне значення функції готовності досягається при довгострокових термінах експлуатації і переході системи практично в усталений режим. У вказаних умовах функція готовності набуває значення загально прийнятого коефіцієнта готовності.

Ключові слова: надійність, безвідмовність, інтенсивність відмов, інтенсивність відновлень, система «людина-машина», функція готовності.

Постановка проблеми

Ускладнення техніки зумовлює необхідність приділення все більшої уваги проблемам її експлуатаційної надійності. Як правило, сучасна машина ефективна разом з людиною-оператором, що керує нею. В сукупності вказані дві складові утворюють єдину ергатичну систему, ефективне функціонування якої залежать від їх сумісної роботи.

Інтенсивність відмов машин визначається, насамперед, їх фізичним станом, напрацюваннями, а також зовнішніми умовами експлуатації. Існуючими інженерними засобами в конструкції машин закладаються заходи направлені на забезпечення необхідного рівня надійності. Разом, з тим, як показує практика експлуатації складної техніки, багато в чому її надійність залежить також від людини-оператора, який вибирає раціональні режими роботи, заздалегідь передбачає можливі випадкові перевантаження, а також приймає заходи із запобігання різного виду можливих випадкових пошкоджень механізмів і вузлів.

Аналіз останніх досліджень

Проблемам і забезпеченню надійності складних систем присвячена значна кількість досліджень. Відомі праці Н. А. Ушакова, А. М. Половко, А. Л. Райкіна, Н. А. Рябініна [25, 26, 28, 29], в яких основна увага приділена технічним системам, способам і методом підвищення їх безвідмовності. В той же час, актуальною проблемою сьогодення є вивчення взаємодії людини-оператора з технічними засобами, від стану і безвідмовності яких, залежить не тільки надійність самої техніки, але й своєчасність та якість виконання технологічних процесів [2, 3, 6-8, 21]. В статтях [5, 10, 22-24, 30-33] наведена актуальність і важливість удосконалення діяльності оператора як складової технічної системи «Людина-Машина», проаналізовано надійність і ефективність функціонування операторів машин і обладнання в тваринництві. Огляд літературних джерел, який представлено в статтях [4, 9, 12, 13, 15-18, 27] відображує дослідження ефективності функціонування та надійність операторів сільськогосподарських машин і машинно-тракторних агрегатів у рослинництві. Але, особливо важливим в науково-практичному плані є проведення досліджень надійності систем при нестаціонарних умовах експлуатації для виявлення кількісних характеристик і показників, а також тенденцій і напрямків їх змін.

Мета досліджень

Метою представленого дослідження є встановлення функції готовності для оцінки

працездатності систем «людина-машина» в умовах зростання інтенсивностей відмов і відновлень.

Результати досліджень

Стан готовності техніки до експлуатації в динамічних перехідних періодах змін інтенсивностей відмов і відновлень кількісно оцінюється коефіцієнтом готовності.

Попередніми дослідженнями [1] запропонована узагальнена математична модель надійності ергатичної системи «людина – машина», що дозволяє на підставі складених стохастичних диференційних рівнянь динамічного балансу ймовірностей станів отримувати окремі характеристики надійності.

Однією з таких важливих характеристик є функція готовності, яка показує зміну готовності техніки до роботи в залежності від часу експлуатації. Функція носить ймовірнісний характер і може бути визначена згідно правила Крамера [14, 19]:

$$K_{\text{г}}(t) \div \varphi(s) = \frac{\Delta_0}{\Delta}, \qquad (1)$$

де $\varphi(s)$ – функція готовності в перетвореннях Лапласа-Красона;

Δ - основний визначник, отриманий в роботі [1];

Δ_0 – визначник системи стохастичних рівнянь, що відповідає працездатному стану.

Встановлення функції готовності системи, що досліджується, передбачає вирішення визначника Δ_0, який знаходиться шляхом заміни стовпчика ймовірності справного стану на стовпчик вільних членів (вираз (5) [1]):

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} 1 & -\mu & 0 & 0 \\ 1 & S & S & S \\ 0 & 0 & S+\lambda'_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S+\lambda''_1 \end{vmatrix}.$$

Для встановлення значення визначника необхідно провести пониження його порядку. В його розкладанні по третій строчці із застосуванням правила Саррюса [4] маємо:

$$\Delta_0 = (S+\lambda'_1)(-1)^{3+3}\begin{vmatrix} 1 & -\mu & 0 \\ 1 & S & S \\ 0 & 0 & S+\lambda''_1 \end{vmatrix} =$$
$$= (S+\lambda'_1)\begin{vmatrix} 1 & -\mu & 0 \\ 1 & S & S \\ 0 & 0 & S+\lambda''_1 \end{vmatrix} =$$
$$= (S+\lambda'_1)(S^2 + S^2\lambda''_1 + \mu\lambda''_1) =$$
$$= S^3 + S^2\lambda''_1 - S^2\mu + S\mu\lambda''_1 +$$
$$+\lambda'_1 S^2 + \lambda'_1 S\lambda''_1 + \lambda'_1\mu + \lambda'_1\mu\lambda''_1$$

Групуючи члени за степенями невідомої, в кінцевому вигляді можемо записати:

$$\Delta_0 = S^3 + S^2(\lambda''_1 + \mu + \lambda''_1) + S(\lambda'_1\lambda''_1 + \mu\lambda''_1 + \lambda'_1\mu) + \lambda'_1\mu\lambda''_1 \qquad (2)$$

Підставляючи чисельник і знаменник у відношення (1) у формі перетворень, функцію готовності, що представляється ймовірністю знаходження дослідженої системи у стані «0», можна записати наступним чином:

$$\varphi_0(S) = (S^3 + S^2(\lambda''_1 + \mu + \lambda'_1) + S(\lambda'_1\lambda''_1 + +\mu\lambda''_1 + \lambda'_1\mu) + \lambda'_1\mu\lambda''_1)/(S^4 + S^3(\lambda''_1 + +\lambda'_1 + +\lambda'_0 + \lambda''_0 + \mu) + \qquad (3)$$
$$+S^2\left(\lambda''_1\lambda'_1 + \lambda'_0\lambda''_1 + \lambda'_0\lambda'_1 + \lambda''_0\lambda''_1 + \lambda''_0\lambda'_1 + +\mu\lambda''_1 + \mu\lambda'_1 + \mu\lambda''_0 + {}^{+}\mu\lambda\right) + S(\mu\lambda'_1\lambda''_1 + +\mu\lambda'_1\lambda''_0 + \mu\lambda'_0\lambda''_1))$$

Оскільки в кінцевому вигляді функцію готовності необхідно отримати в оригіналі перетворень, а не в образах, то для виконання операцій зворотніх переходів від образу до оригіналу необхідно функцію $\varphi_0(S)$ представити у вигляді еквівалентного рівняння слідуючої суми [29]:

$$\varphi_0(S) = \frac{A_0}{S-S_1} + \frac{B_0}{S-S_2} + \frac{C_0}{S-S_3} + \frac{D_0}{S-S_4}, \qquad (4)$$

де A_0, B_0, C_0, D_0 – деякі константи, що потребують визначення;

S_1, S_2, S_3, S_4 – корені многочлена знаменника (3).

Ввівши наступні позначення для знаменника запишемо:

$\alpha = \lambda''_1 + \lambda'_1 + \lambda'_0 + \lambda''_0 + \mu;$

$\beta = \lambda''_1\lambda'_1 + \lambda'_0\lambda''_0 + \lambda'_0\lambda'_1 + \lambda''_0\lambda''_1 + \lambda''_0\lambda'_1 + +\mu\lambda''_1 + \mu\lambda'_1 + \mu\lambda''_0 + \lambda'_0;$

$\gamma = \mu\lambda'_1\lambda''_1 + \mu\lambda'_1\lambda''_0 + \mu\lambda'_0\lambda''_1.$

Можна його записати скорочено:

$$\Delta = S^4 + \alpha S^3 + \beta S^2 + \gamma S.$$

Для знаходження коренів представимо рівняння наступним чином:

$$S(S^3 + \alpha S^2 + \beta S + \gamma) = 0$$

Звідси видно, що перший корінь S_1=1, а пошук інших коренів потребує вирішення кубічного рівняння:

$$S^3 + \alpha S^2 + \beta S + \gamma = 0. \qquad (5)$$

Внесемо заміну невідомої:

$$y = S + \frac{\alpha}{3};\ y = S - \frac{\alpha.}{3} \qquad (6)$$

Тоді, отримаємо:

$$(y - \frac{\alpha}{3})^3 + \alpha(y - \frac{\alpha}{3})^2 + \beta(y - \frac{\alpha}{3}) + \gamma = 0\,.$$

Після виконання алгебраїчних перетворень, рівняння представляється у приведеній формі:

$$y^3 + \left(\frac{3\beta - \alpha^2}{3}\right)y + \left[\frac{2\alpha^2}{27} - \frac{\alpha\beta}{3} + \gamma\right] = 0.$$

Детермінантом отриманого кубічного рівняння є наступний вираз:

$$D = \left(\frac{3\beta - \alpha^2}{9}\right) + \left[\frac{2\alpha^3}{54} - \frac{\alpha\beta}{6} + \frac{\gamma}{2}\right]^2.$$

Вид шуканих коренів залежить від знаку, що набуває детермінант. Попередня якісна оцінка можливого знаку показує, що перша складова при підстановці значень α і β, характерних для практики експлуатації складної техніки завжди набуває від'ємних значень. Природньо, що середній наробіток на відмову $\bar{t}$ на декілька порядків перебільшує середній час відновлень μ. В наслідок цього $\lambda \ll \mu$ і це визначає від'ємне значення першої складової.

Друга складова має три члени. Перший α є сумою трьох інтенсивностей відмов і інтенсивності відновлення, другий має від'ємний знак, що знижує загальну величину другої складової детермінанту. Третій член, що включає γ сам по собі незначний оскільки, утворюється квадратом малої величини λ_i^2 помноженою на $\mu < 1$.

На підставі приведеного аналізу можна з великою долею достовірності стверджувати, що для

реальних значень λ, μ – характеристик системи «людина – машина» детермінант є від'ємною величиною $D<0$. Це вказує на те, що кубічне рівняння, яке вирішується має три дійсних корені.

Для знаходження коренів застосуємо формулу Кардано. До рівняння у приведеній формі введемо два додаткових параметри:

$$\rho = \sqrt{-\frac{(3\beta-\alpha^2)^3}{27^2}};$$

$$\cos\varphi = \frac{\frac{2\alpha^3}{27}-\frac{\alpha\beta}{3}+\varphi}{2\cdot\sqrt{-\frac{(3\beta-\alpha^2)^3}{27^2}}}.$$

Тоді коренями при вирішенні приведеного рівняння будуть:

$$y_1 = 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3}\right);$$

$$y_2 = 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3}\right)+\left(\frac{2\pi}{3}\right);$$

$$y_3 = 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3}\right)+\left(\frac{4\pi}{3}\right).$$

Зворотною заміною (6) знаходяться корені початкового кубічного рівняння(5).

$$S_2 = 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3}\right);$$

$$S_3 = 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3}\right)+\left(\frac{2\pi}{3}\right);$$

$$S_4 = 2\sqrt[3]{\rho}\cos\left(\frac{\varphi}{3}\right)+\left(\frac{4\pi}{3}\right).$$

Таким чином, всі корені S_1, S_2, S_3 і S_4 полінома знаменника відношення (3) знайдені і в кінцевому представлені через інтенсивності подій λ_i і μ.

Повертаючись до еквівалентного рівняння (4) постає завдання в знаходженні постійних величин A_0, B_0, C_0, D_0. Використавши додаткові множники, рівняння можна переписати у наступному вигляді:

$$\varphi_0(S) = (A_0(S-S_2)(S-S_3)(S-S_4) + +B_0S(S-S_3)(S-S_4) + C_0S(S-S_2)(S-S_4) + +D_0S(S-S_2)(S-S_3))/S(S-S_2)(S-S_3)\times \quad \times(S-S_4) \tag{7}$$

Виконавши алгебраїчні перетворення чисельник у розкладені за степенями невідомої представляється наступним чином:

$$S^3(A_0+B_0+C_0+D_0) - S^2(A_0S_3+A_0S_2+A_0S_4+ +B_0S_4+B_0S_3+C_0S_4+C_0S_2+D_0S_3+D_0S_2) + +S(A_0S_2S_3+A_0S_4S_3+A_0S_4S_2+B_0S_3S_4+ +C_0S_2S_4+ D_0S_2S_3) + A_0S_4S_2S_3 \tag{8}$$

При рівності знаменників (3) і (7), чисельники (3) і (8) будуть теж рівними при умові, що коефіцієнти при однакових степенях невідомої S теж дорівнюють один одному.

Тоді, для визначення сталих A_0, B_0, C_0, D_0 можна записати наступну додаткову систему рівнянь:

$$\begin{cases} A_0+B_0+C_0+D_0 = 1; \\ A_0S_3+A_0S_2+A_0S_4+B_0S_4+B_0S_3+C_0S_4+ \\ +C_0S_2+D_0S_3+D_0S_2 = \lambda''_1+\mu+ \\ A_0S_2S_3+A_0S_4S_3+A_0S_4S_2+B_0S_3S_4+C_0S_2S_4=\mu; \\ A_0S_4S_2S_3 = \lambda''_1\mu\lambda'_1. \end{cases}$$

$$\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1$$

Для вирішення системи отриманих рівнянь використаємо метод послідовних підстановок. Із останнього рівняння маємо сталу A_0:

$$A_0 = \frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_4S_2S_3} \tag{10}$$

Підставивши A_0 в третє рівняння (9), запишемо:

$$\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_4S_2S_3}(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2)+B_0S_3S_4+C_0S_2S_4+ +D_0S_2S_3 = \lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1\mu$$

Вирішимо відносно B_0:

$$B_0 = \frac{\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1\mu}{S_4S_3} - -\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_2S_3^2S_4^2}(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2) - C_0\frac{S_2}{S_3} - -D_0\frac{S_2}{S_4} \tag{11}$$

Знайдемо сталу C_0 з другого рівняння системи (9), підставивши складові:

$$\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_4S_2S_3}(S_3+S_2+S_4) + +\left[\frac{\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1\mu}{S_3S_4} - -\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_2S_3^2S_4^2}(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2) - C_0\frac{S_2}{S_3} - D_0\frac{S_2}{S_4}\right]\cdot (S_4+S_3) + C_0(S_4+S_2) + D_0(S_3+S_2) = = \lambda''_1+\mu+\lambda'_1$$

Виділимо C_0:

$$C_0\left(S_4+S_3-\frac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right)= = \lambda''_1+\mu+\lambda'_1 - \frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_4S_2S_3}(S_3+S_2+S_4) - -\frac{\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1\mu(S_4+S_3)}{S_3S_4} + +\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_3+S_4)}{S_2S_3^2S_4^2}(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2) + +D_0\left[\frac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}-S_3-S_2\right]$$

Звідси C_0 дорівнює:

$$C_0 = \frac{\lambda''_1+\mu+\lambda'_1}{S_4+S_2-\frac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}} - -\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_3+S_2+S_4)}{S_4S_2S_3\left[S_4+S_2-\frac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]} - -\frac{\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1\mu(S_4+S_3)}{S_3S_4\left[S_4+S_2-\frac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]} + +\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_3+S_4)(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2)}{S_2S_3^2S_4^2\left[S_4+S_2-\frac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]} + +D_0\frac{\frac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}-S_3-S_2}{S_4+S_2-\frac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}} \tag{12}$$

Для визначення сталої D_0 використаємо перше рівняння системи (9). Підст авимо в нього складові рівняння:

$$\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_4S_2S_3}+\frac{\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1\mu}{S_3S_4} - -\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_2S_3^2S_4^2}(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2) -$$

$$-\frac{S_2}{S_3}\left[\begin{array}{c}\dfrac{\lambda''_1+\mu+\lambda'_1}{S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}}-\\ -\dfrac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_4+S_2+S_3)}{S_4S_2S_3S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}}-\\ -\dfrac{\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1\mu(S_4+S_3)}{S_3S_4\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}+\\ +\dfrac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_3+S_4)(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2)}{S_2S_3^2S_4^2\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}\end{array}\right]+$$

$$+D_0\left[\frac{\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}-S_3-S_2}{S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}}\right]\frac{S_2}{S_3}+$$

$$+\frac{\lambda''_1+\mu+\lambda'_1}{S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}}-$$

$$-\frac{\lambda''_1+\mu+\lambda'_1}{S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}}-$$

$$-\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_3+S_2+S_4)}{S_4S_2S_3\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}-$$

$$-\frac{\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\mu\lambda'_1(S_4+S_3)}{S_3S_4\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}+$$

$$+\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_3+S_4)(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2)}{S_2S_3^2S_4^2\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}+$$

$$+D_0\frac{\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}-S_3-S_2}{S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}}+D_0=1$$

Спростивши вираз і виділяючи сталу D_0 в кінцевому вигляді маємо:

$$-\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_4S_2S_3}-\frac{\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1\mu}{S_3S_4}+$$

$$+\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_2S_3^2S_4^2}(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2)+$$

$$+\frac{S_2}{S_3}\left[\begin{array}{c}\dfrac{\lambda''_1+\mu+\lambda'_1}{S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}}-\\ -\dfrac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_4+S_2+S_3)}{S_4S_2S_3\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}-\\ -\dfrac{\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1\mu(S_4+S_3)}{S_3S_4\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}-\\ -\dfrac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_3+S_4)(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2)}{S_2S_3^2S_4^2\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}\end{array}\right]-$$

$$-\frac{\lambda''_1+\mu+\lambda'_1}{S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}}+$$

$$+\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_4+S_2+S_3)}{S_4S_2S_3\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}+$$

$$+\frac{\lambda'_1\lambda''_1+\mu\lambda''_1+\lambda'_1\mu(S_4+S_3)}{S_3S_4\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}-$$

$$-\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1(S_3+S_4)(S_2S_3+S_4S_3+S_4S_2)}{S_2S_3^2S_4^2\left[S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}\right]}-$$

$$-1/\frac{\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}-S_3-S_2}{S_4+S_2-\dfrac{S_2(S_4+S_3)}{S_4}}\left(\frac{S_2}{S_3}+1\right)+$$

$$+1 \qquad (13)$$

Отриманий вираз, незважаючи на свою громіздкість, складається з комбінацій λ_i, μ - характеристик і коренів S_i. Враховуючи, що корені також містять λ_i, μ - характеристики і визначаються ними, значення постійної D_0 повністю залежать від останніх, що значно спрощує завдання аналізу і розрахунку надійності досліджуваної системи «людина-машина».

Зворотньою підстановкою отриманої сталої D_0 в рівнянні (12) визначається стала C_0. Внаслідок громіздкості виразів ця операція не приводиться. Немає рації її виконувати і з умов практичного застосування розрахунків, так як для їх проведення необхідно мати всі значення сталих A_0, B_0, C_0 і D_0. Тому доцільно їх величини розрахувати в слідуючій послідовності:

$$D_0 \to C_0 \to B_0,$$

Для знаходження B_0 необхідно попередньо визначені постійні D_0 і C_0 підставити в рівняння (11).

В свою чергу стала A_0 встановлена безпосередньо через λ_i, μ - характеристики згідно виразу (10).

Зворотнім перетворенням Лапласа здійснюється перехід до оригіналу. Тоді, функція готовності, що відповідає ймовірності знаходження ергатичної системи «людина-машина» у стані «0» запишеться у наступному вигляді:

$$K_г(t)=P_0(t)=A_0+B_0\exp(-S_2t)+$$
$$+C_0\exp(\exp(-S_3t)+$$
$$+D_0\exp(\exp(-S_4t) \qquad (14)$$

Перевіркою отриманої залежності може бути оцінка особливостей її складових. Так, перша з них представляє сталу величину, що не залежить від часу експлуатації. Три слідуючі складові експоненціально залежать від часу. Підставляючи у рівняння (14) нульове значення часу $t=0$ (початок експлуатації) маємо $K_г(t)=1$, що відповідає фізичній сутності задачі і початковій умові, коли система починає роботу знаходячись у справному стані. При другій крайній ситуації, коли час прямує до нескінченності $t\to\infty$, функція готовності $K_г(t)$ прямує до свого фінішного значення, що дорівнює:

$$K_г(\,t\to\infty)=A_0=\frac{\lambda''_1\mu\lambda'_1}{S_4S_2S_3}. \qquad (15)$$

Приведений аналіз з урахуванням експоненціальних складових (14) відкриває можливість побудувати графік залежності зміни функції готовності від часу експлуатації системи «людина-машина». Таким чином, представляється можливість кількісної оцінки втрати працездатності досліджуваної системи при зниженні її потенціальної надійності внаслідок старіння техніки і втоми

операторів, що нею керують. Вид такої залежності представлено на рисунку.

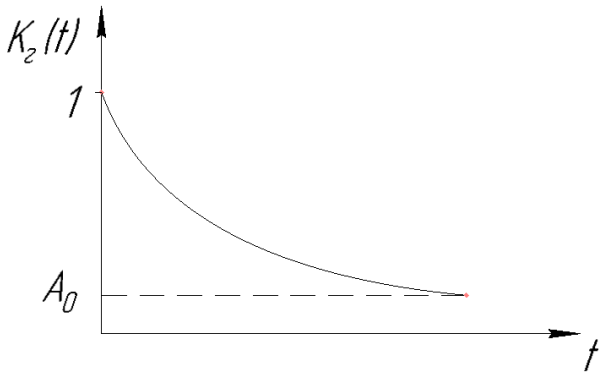

Рис. Зміна готовності соціо-технічної системи при зменшенні працездатності.

Fig. Change readiness socio-technical systems while reducing health.

Асимптотичне наближення функції готовності до сталого значення A_0 при збільшенні терміну експлуатації вказує на поступову стабілізацію процесу «старіння» системи, що розглядається. Фінішна постійна величина функції готовності представляє собою загально прийнятий коефіцієнт готовності, який приводиться у відповідній технічній документації, а також результатах випробувань техніки. Він є комплексною характеристикою готовності її до експлуатації.

Висновки

1. Експлуатаційна готовність складної ергатичної системи «людина-машина» в перехідний період зниження ефективності її роботи описується функцією готовності, що включає в себе чотири складових, три з яких представляють суму експонент.
2. Зі зростанням часу експлуатації системи «людина-машина» готовність її до роботи в умовах «старіння» техніки і наростання втоми операторів знижується асимптотично наближаючись до свого фінішного значення.
3. Фінішне значення функції готовності досягається при довгострокових термінах експлуатації і переході системи практично в усталений режим. У вказаних умовах функція готовності набуває значення загально прийнятого коефіцієнта готовності, що визначається постійною величиною A_0.

Список літератури

1. *Boyko A., Novitskiy A.* Mathematical model of reliability of human-machine system under reduced efficiency of its generalized work. *Machinery & Energetics*. Kyiv. Ukraine. 2018. Vol. 9. No. 3. 271. P. 165-174.

2. *Ivan Rogovskii, Liudmyla Titova, Andriy Novitskii, Victor Rebenko*. Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. Engineering for rural development, Jelgava, 2019.

3. *Novitskiy A., Karabinhosh S.* Some aspects of information support for operability of complex agricultural machinery. *Machinery & Energetics* . Kyiv. Ukraine. 2018. Vol. 9. No. 2. 241. P. 106-121.

4. *Novitskiy Andrey.* Professional Reliability of Personnel in System of Development of Innovative Processes. TEKA. *An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin-Rzeszow.* 2018.Vol. 18. No 2, 93-102.

5. *Адамчук В. В., Грицишин* М. І. Пріоритетні напрямки агроінженерних досліджень. Механізація *та електрифікація сільського господарства*. *2013*. Вип. 97. С. 14-23.

6. *Аулин В. В., Гринькив А. В.* Использование теоретико-информационного подхода для анали за технического состояния топливной системы автомобіля. *"MOTROL" journal according of the Commission of Motorization and Energeticin Agricul*ture, CULS. 2016. Vol.18, №2. P.63-69.

7. *Аулін В. В., Гриньків А. В., Замота Т. М.* Забезпечення та підвищення експлуатаційної надійності транспортних засобів на основі використання методів теорії чутливості. *Вісник Інженерної академії України*. (2015): 66-73.

8. *Бойко А. І., Новицький А. В.* Математичне моделювання системи «людина – машина» при накопиченні відмов**.** *Вісник Харківського НТУСГ*, Вип. 134. Харків, 2013. С. 75-80.

9. *Бойко А. І., Савченко В. М., Крот В. В.* Проблеми забезпечення надійності технологічного обладнання при вирощуванні продукції захищеного ґрунту в АПК України**.** *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів.* Харків, 2016. Вип. 6. С. 75-80.

10. *Болтянська Н. І.* Підвищення експлуатаційної надійності машин і обладнання тваринництва прогнозуванням кількісного та номенклатурного складу запасних частин : автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.05.11. Мелітополь, 2005. 23 с.

11. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике. Москва: издательство технико-теоретический литературы. 1955. 608 с.

12. *Васильковська К., Васильковський О., Петренко Д.* Совершенствование техники для посева – начальный этап программирования урожайности**.**Ştiinţa agricolă, nr. 2 (2016). С. 99-103.

13. *Войтюк В. Д.* Техніко-технологічний розвиток системи сервісу енергонасиченої сільськогосподарської техніки: автореф. дис. … докт. техн. наук: 05.05.11. Мелітополь, 2012. 39 с.

14. *Головина Л. Н.* Линейная алгебра и некоторые ее приложения, Москва: «Наука». 1975. 407 с.

15. *Думенко К. М.* Дослідження надійності зернозбиральних комбайнів. *Збірник наукових статей Луцького національного технічного університету: Сільськогосподарські маши*ни. Луцьк: ЛНТУ, 2010. Випуск 20. С. 68-78.

16. *Краснощеков Н. В.* Машинно-технологические станции и техническая политика в АПК. Техника в сельском хозяйстве. 1999. №5. С. 3-9.

17. *Липкович И. Э.* Механико-эргономическое обоснование человекомашинных систем в агроинженерной сфере растениеводства: автореф. дис. … докт. техн. наук: 05.20.01, 05.20.03. Краснодар, 2004. 48 с.

18. *Лукиных Г. Ф.* Разработка методов повышения надежности и эффективности функционирования технологических комплексов производства зерна и кормов: автореф. дисс. … докт. техн. наук: 05.20.01. Чебоксары, 2007. 36 с.

19. *Мальцев А. И.* Основы линейной алгебры, Москва: «Наука». 1975. 400 с.

20. *Новицкий А. В.* Исследование надёжности сложных технических систем «человек-машина» методом графов. *Motrol, motoryzacia i energetyka rolnictwa motorization and power industry in agriculture*. Lublin, 2014. Vol. 16, № 3. P.96-102.

21. *Новицький А. В.* Інноваційність надійного функціонування операторів складних технічних систем «людина-машина» в рослинництві. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК.* К., 2018. Випуск 282, (2018). С. 236-244.

22. *Новицький А. В.* Огляд теоретичних досліджень надійного функціонування складних технічних систем у тваринництві. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК.* К., 2016. Вип. 254, ч. 3. С. 334-338.

23. *Петренко Н. В.* Повышение производительности зерноуборочных агрегатов обоснованием режимов работы операторов. *Вестник аграрной науки Дона. Теоретический и научно-практический журнал.* Зерноград, 2009. № 1. С. 14-22.

24. *Поздняков В. Д.* Повышение надежности и эффективности функционирования операторов механизированных процессов животноводства: автореф. дис. … докт. техн. наук: 05.20.01. Оренбург, 2006. 44 с.

25. *Половко А. М.* Основы теории надежности. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.

26. *Райкин А. Л.* Элементы теории надежности для проектирования технических систем. М. «Советское радио». 1967. 262 с.

27. *Роговський Іван.* Стохастические модели обеспечения работоспособности сельско-хозяйственных машин. *Motrol: Motorization and power industry in agriculture*. 2014. Tom 16, №3. P. 296-302.

28. *Рябинин А. И.* Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. Санкт-Петербург: Политехника, 2000. 248 с.

29. *Ушаков И. А.* Курс теории надежности систем. Москва: «Дрофа». 2008. 240 с.

30. *Фененко А. І.* Техніко-технологічні аспекти розвтику біотехнічних систем виробництва молока. *Механізація та електрифікація сільського господарства*, 99 (1). Глеваха, 2014. с. 476-485.

31. *Хлопко Ю. А. Ротова В. А., Осипова А. М.* Перспективные направления совершенствования процесса чески пуха коз с позиции сложной биотехнической системы «человек-машина-животное». *Современные проблемы науки и образования.* 2014. № 5.; URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15109 (дата обращения: 01.08.2016).

32. *Хмельовський В. С., Ачкевич О. М.* Дослідження процесу приготування високоенергетичної кормової суміші для ВРХ. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК.* Київ. 2017. Вип. 262. С. 304-314.

33. *Яковенко Т. П.* Повышение технилогической надежности оператора путем совершенствования условий труда в системе «человек-машина-животное» : автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.20.01. Оренбург, 2003. 21 с.

References

1. *Boyko A., Novitskiy A.* Mathematical model of reliability of human-machine system under reduced efficiency of its generalized work. *Machinery & Energetics.* Kyiv. Ukraine. 2018. Vol. 9. No. 3. 271. P. 165-174.

2. *Ivan Rogovskii, Liudmyla Titova, Andriy Novitskii, Victor Rebenko.* Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. *Engineering for rural development*, Jelgava, 2019.

3. *Novitskiy A., Karabinhosh S.* Some aspects of information support for operability of complex agricultural machinery. *Machinery & Energetics*. Kyiv. Ukraine. 2018. Vol. 9. No. 2. 241. P. 106-121.

4. *Novitskiy Andrey*. Professional Reliability of Personnel in System of Development of Innovative Processes. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering.* Lublin-Rzeszow. 2018.Vol. 18. No 2, 93-102.

5. *Adamchuk V. V., Hrytsyshyn M. I.* Priorytetni napriamky ahroinzhenernykh doslidzhen. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva.* 2013. Vyp. 97. S. 14-23.

6. *Aulyn V. V., Hrynkyv A. V.* Yspolzovanye teoretyko-ynformatsyonnoho podkhoda dlia analy za tekhnycheskoho sostoianyia toplyvnoi systemы avtomobilia. *"MOTROL" journal according of the Commission of Motorization and Energeticin Agriculture,* CULS. 2016. Vol.18, №2. P.63-69.

7. *Aulin V. V., Hrynkiv A. V., Zamota T. M.* Zabezpechennia ta pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti transportnykh zasobiv na osnovi vykorystannia metodiv teorii chutlyvosti. *Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy*. (2015): 66-73.

8. *Boiko A. I., Novytskyi A. V.* Matematychne modeliuvannia systemy «liudyna – mashyna» pry nakopychenni vidmov. *Visnyk Kharkivskoho NTUSH*, Vyp. 134. Kharkiv, 2013. S. 75-80.

9. *Boiko A. I., Savchenko V. M., Krot V. V.* Problemy zabezpechennia nadiinosti tekhnolohichnoho obladnannia pry vyroshchuvanni produktsii zakhyshchenoho gruntu v APK Ukrainy. *Tekhnichnyi servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. Kharkiv, 2016. Vyp. 6. S. 75-80.

10. *Boltianska N. I.* Pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti mashyn i obladnannia tvarynnytstva prohnozuvanniam kilkisnoho ta nomenklaturnoho skladu zapasnykh chastyn : avtoref. dys. … kand. tekhn. nauk: 05.05.11. Melitopol, 2005. 23 s.

11. *Bronshtein Y. N., Semendiaev K. A.* Spravochnyk po matematyke. Moskva: yzdatelstvo tekhnyko-teoretycheskyi lyteraturы. 1955. 608 s.

12. *Vasylkovska K., Vasylkovskyi O., Petrenko D.* Sovershenstvovanye tekhnyky dlia poseva – nachalnыi эtap prohrammyrovanyia urozhainosty. *Ştiinţa agricolă*, nr. 2 (2016). S. 99-103.

13. *Voitiuk V. D.* Tekhniko-tekhnolohichnyi rozvytok systemy servisu enerhonasychenoi silskohospodarskoi tekhniky: avtoref. dys. … dokt. tekhn. nauk: 05.05.11. Melitopol, 2012. 39 s.

14. *Holovyna L. N.* Lyneinaia alhebra y nekotorыe ee prylozhenyia, Moskva: «Nauka». 1975. 407 s.

15. *Dumenko K. M.* Doslidzhennia nadiinosti zernozbyralnykh kombainiv. *Zbirnyk naukovykh statei Lutskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu: Silskohospodarski mashyny.* Lutsk: LNTU, 2010. Vypusk 20. S. 68-78.

16. *Krasnoshchekov N. V.* Mashynno-tekhnolohycheskye stantsyy y tekhnycheskaia polytyka v APK. *Tekhnyka v selskom khoziaistve.* 1999. №5. S. 3-9.

17. *Lypkovych Y. Э.* Mekhanyko-эrhonomycheskoe obosnovanye chelovekomashynnыkh system v ahroynzhenernoi sfere rastenyevodstva: avtoref. dys. … dokt. tekhn. nauk: 05.20.01, 05.20.03. Krasnodar, 2004. 48 s.

18. *Lukynыkh H. F.* Razrabotka metodov povыshenyia nadezhnosty y эffektyvnosty funktsyonyrovanyia tekhnolohycheskykh kompleksov proyzvodstva zerna y kormov: avtoref. dyss. … dokt. tekhn. nauk: 05.20.01. Cheboksarы, 2007. 36 s.

19. *Maltsev A. Y.* Osnovы lyneinoi alhebrы, Moskva: «Nauka». 1975. 400 s.

20. *Novytskyi A. V.* Yssledovanye nadëzhnosty slozhnыkh tekhnycheskykh system «chelovek-mashyna» metodom hrafov. *Motrol, motoryzacia i energetyka rolnictwa motorization and power industry in agriculture*. Lublin, 2014. Vol. 16, № 3. R.96-102.

21. *Novytskyi A. V.* Innovatsiinist nadiinoho funktsionuvannia operatoriv skladnykh tekhnichnykh system «liudyna-mashyna» v roslynnytstvi. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriia: tekhnika ta enerhetyka APK*. K., 2018. Vypusk 282, (2018). S. 236-244.

22. *Novytskyi A. V.* Ohliad teoretychnykh doslidzhen nadiinoho funktsionuvannia skladnykh tekhnichnykh system u tvarynnytstvi. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriia: tekhnika ta enerhetyka APK*. K., 2016. Vyp. 254, ch. 3. S. 334-338.

23. *Petrenko N. V.* Povыshenye proyzvodytelnosty zernouborochnыkh ahrehatov obosnovanyem rezhymov rabotы operatorov. *Vestnyk ahrarnoi nauky Dona. Teoretycheskyi y nauchno-praktycheskyi zhurnal. Zernohra*d, 2009. № 1. S. 14-22.

24. *Pozdniakov V. D.* Povыshenye nadezhnosty y эffektyvnosty funktsyonyrovanyia operatorov mekhanyzyrovannыkh protsessov zhyvotnovodstva: avtoref. dys. … dokt. tekhn. nauk: 05.20.01. Orenburh, 2006. 44 s.

25. *Polovko A. M.* Osnovы teoryy nadezhnosty. SPb.: BKhV-Peterburh, 2006. 704 s.

26. *Raikyn A. L.* Эlementы teoryy nadezhnosty dlia proektyrovanyia tekhnycheskykh system. M. «Sovetskoe radyo». 1967. 262 s.

27. *Rohovskyi Ivan.* Stokhastycheskye modely obespechenyia rabotosposobnosty selsko-khoziaistvennыkh mashyn. *Motrol: Motorization and power industry in agriculture*. 2014. Tom 16, №3. P. 296-302.

28. *Riabynyn A. Y.* Nadëzhnost y bezopasnost strukturno-slozhnыkh system. Sankt-Peterburh: Polytekhnyka, 2000. 248 s.

29. *Ushakov Y. A.* Kurs teoryy nadezhnosty system. Moskva: «Drofa». 2008. 240 s.

30. *Fenenko A. I.* Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvtyku biotekhnichnykh system vyrobnytstva moloka. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva,* 99 (1). Hlevakha, 2014. s. 476-485.

31. *Khlopko Yu. A. Rotova V. A., Osypova A. M.* Perspektyvnыe napravlenyia sovershenstvovanyia protsessa chesky pukha koz s pozytsyy slozhnoi byotekhnycheskoi systemы «chelovek-mashyna-zhyvotnoe». *Sovremennыe problemы nauky y obrazovanyia.* 2014. № 5.; URL: http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=15109 (data obrashchenyia: 01.08.2016).

32. *Khmelovskyi V. S., Achkevych O. M.* Doslidzhennia protsesu pryhotuvannia vysokoenerhetychnoi kormovoi sumishi dlia VRKh. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriia: tekhnika ta enerhetyka APK*. Kyiv. 2017. Vyp. 262. S. 304-314.

33. *Iakovenko T. P.* Povыshenye tekhnylohycheskoi nadezhnosty operatora putem sovershenstvovanyia uslovyi truda v systeme «chelovek-mashyna-zhyvotnoe» : avtoref. dys. … kand. tekhn. nauk: 05.20.01. Orenburh, 2003. 21 s.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ ГОТОВНОСТИ СИСТЕМ «ЧЕЛОВЕК - МАШИНА» ПРИ РОСТЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ

А. В. Новицкий, З. В. Ружило

Аннотация. В статье приведены исследования с установления функции готовности эргатической системы «человек-машина» в переходной период снижения их безотказности. Установление вида функции готовности решено аналитическим методом с применением прямых и обратных преобразований Лапласа-Карсона.

В граничных условиях в начале эксплуатации и в условиях установившегося псевдо-стационарного

режима при длительной эксплуатации систем, получена функция готовности, которая соответствует физической сущности работоспособного состояния системы. В установившемся режиме функция готовности принимает значения общепринятого коэффициента готовности.

Эксплуатационная готовность сложной эргатической системы «человек-машина» в переходной период снижения эффективности ее работы описывается функцией готовности, включающей в себя четыре составляющих, три из которых представляют сумму экспонент. С возрастанием времени эксплуатации системы «человек-машина», готовность ее к работе в условиях «старения» техники и нарастания усталости операторов, снижается асимптотически приближаясь к своему финишному значению.

Финишное значение функции готовности достигается при долгосрочных сроках эксплуатации и переходе системы практически в устоявшийся режим. В указанных условиях функция готовности приобретает значение общепринятого коэффициента готовности.

Ключевые слова: надежность, безотказность, интенсивность отказов, интенсивность восстановлений, система «человек-машина», функция готовности.

DETERMINATION OF FUNCTION OF READINESS OF “HUMAN-MACHINE” SYSTEMS DURING GROWTH OF FAULT RATE

A. V. Novitskiy, Z. V. Rozhilo

Abstract. The article presents studies on the establishment of the function of the readiness of the «human-machine» ergatic systems in the transitional period of reducing their failures. The establishment of the form of the readiness function is solved analytically using the direct and inverse Laplace-Carson transformations.

In the boundary conditions at the beginning of operation and in the conditions of the established pseudo-stationary regime during prolonged operation of the systems, a function of readiness is received which corresponds to the physical essence of the working state of the systems. In standby mode, the readiness function acquires the values of the generally accepted readiness factor.

The operational readiness of a complex «human-machine» ergatic system in a transitional period, reducing the effectiveness of its work, is described by the readiness function, which includes four components, three of which represent the sum of exhibitors. With the increase in the time of exploitation of the «human-machine» system, its readiness to work in the conditions of «aging» of technology and the increase in the fatigue of operators decreases asymptotically closer to its final value.

The final value of the readiness function is achieved in the long term of operation and the transition of the system to virtually steady state. In these conditions, the readiness function acquires the value of the generally accepted readiness factor.

Key words: reliability, faultless, intensity, failure, update intensity, the «human-machine» system, readiness function.

А. В. Новицький ORCID 0000-0001-7789-8531.
З. В. Ружило ORCID 0000-0002-0317-7683.